

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Rio Culiacán (2504),
Estado de Sinaloa***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE SINALOA							
2504	RÍO CULIACÁN	416.9	173.4	226.454788	168.9	17.045212	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



***Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos***

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO RÍO CULIACÁN (2504), ESTADO DE
SINALOA***

México, D.F., Noviembre de 2013

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	1
	Antecedentes	1
1.1.	Localización	1
1.2.	Situación administrativa del acuífero	4
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	5
3.1.	Provincia fisiográfica	5
3.2.	Clima	6
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA	7
4.1.	Estratigrafía	8
4.2.	Geología estructural	10
4.3.	Geología del subsuelo	10
5.	HIDROGEOLOGÍA	11
5.1.	Tipo de acuífero	11
5.2.	Parámetros hidráulicos	11
5.3.	Piezometría	11
5.4.	Comportamiento hidráulico	12
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	12
5.4.2.	Elevación del nivel estático	12
5.4.3.	Evolución del nivel estático	14
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	15
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	15
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	16
7.1.	Entradas	16
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	16
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	17
7.1.3.	Recarga inducida (Ri)	18
7.2.	Salidas	19
7.2.1.	Bombeo (B)	19
7.2.2.	Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh)	19
7.2.3.	Descarga por flujo base de los ríos (Dfb)	20
7.2.4.	Descarga por manantiales (Dm)	20
7.2.5.	Evapotranspiración (ETR)	20
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	22
8.	DISPONIBILIDAD	23
8.1.	Recarga total media anual (Rt)	23
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	24
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	24
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	24
9.	BIBLIOGRAFÍA	25

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Río Culiacán definido con la clave 2504 en el Sistema de información geográfica para el manejo del agua subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del Estado de Sinaloa, entre los paralelos 24°25' y 26° 00' de latitud norte y los meridianos 105° 47' y 108° 10' de longitud oeste, abarca una superficie de 20,389 km².

Limita al norte con los acuíferos Río Sinaloa y Río Fuerte, al sur con el acuífero Río San Lorenzo, al oeste con el acuífero Río Mocorito, pertenecientes al Estado de Sinaloa; hacia el este limita con los acuíferos Matalotes-El Oro y Tepehuanes-Santiago, pertenecientes al estado de Durango, al noreste con Bocoyna, perteneciente al estado de Chihuahua, al suroeste su límite es el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente abarca totalmente el municipio Topia y parcialmente Guanaceví, Tepehuanes, Tamazula y Canelas, pertenecientes al Estado de Durango; también cubre parcialmente el municipio Guadalupe y Calvo del Estado de Chihuahua y los municipios Badiraguato, Mocorito, Navolato, Culiacán y pequeñas porciones de Cosalá y Angostura, en el Estado de Sinaloa.

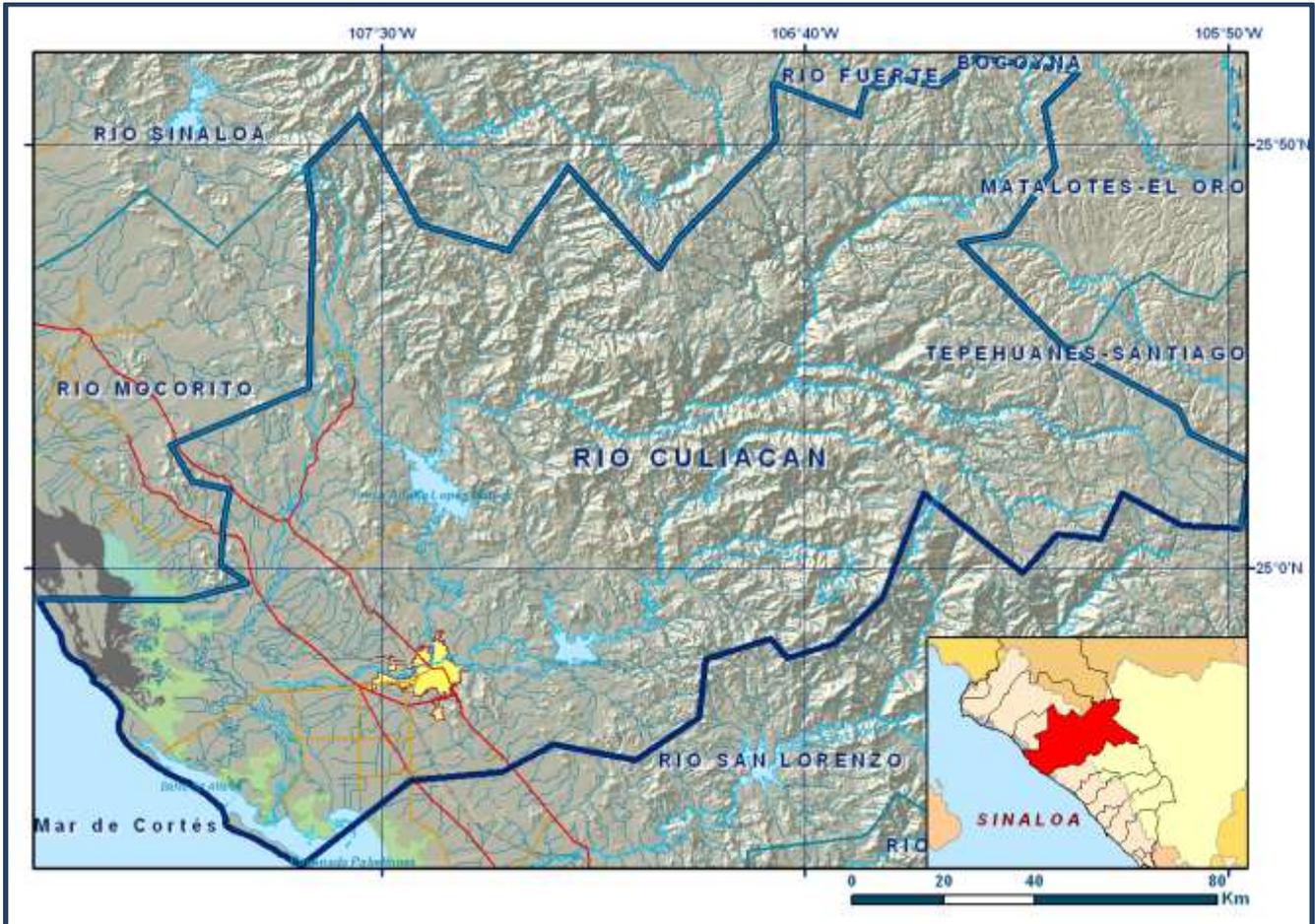


Figura 1, Localización del acuífero Río Culiacán

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2504 RIO CULIACAN							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	106	24	28.1	25	56	55.5	
2	106	19	50.6	26	0	20.7	
3	106	7	41.3	25	58	40.6	
4	106	11	48.5	25	54	33.4	
5	106	10	30.8	25	47	22.5	
6	106	16	20.4	25	39	22.2	
7	106	21	40.7	25	38	31.4	
8	106	9	30.4	25	26	8.5	
9	105	55	58.1	25	18	51.6	
10	105	54	34.5	25	15	59.7	
11	105	47	30.2	25	12	26.7	
12	105	48	35.3	25	4	43.8	
13	105	55	28.2	25	5	2.2	
14	106	2	34.8	25	8	53.8	
15	106	5	8.5	25	3	32.7	
16	106	10	18.1	25	4	4.8	
17	106	14	18.9	24	59	29.6	
18	106	26	3.0	25	8	53.8	
19	106	30	55.3	24	56	21.4	
20	106	36	33.7	24	51	7.4	
21	106	42	8.3	24	49	23.3	
22	106	44	7.3	24	51	40.9	
23	106	51	47.2	24	49	13.7	
24	106	52	30.5	24	42	22.8	
25	107	0	5.0	24	37	19.6	
26	107	9	42.1	24	39	11.5	
27	107	15	54.5	24	35	51.1	
28	107	26	34.1	24	34	51.4	
29	107	39	34.3	24	24	46.8	DEL 29 AL 30 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
30	108	10	34.4	24	56	19.1	
31	107	53	30.0	24	56	17.0	
32	107	45	56.0	24	58	16.0	
33	107	49	4.1	25	0	23.3	
34	107	48	46.0	25	5	35.0	
35	107	48	0.0	25	9	17.0	
36	107	52	27.0	25	10	17.0	
37	107	54	56.1	25	14	31.6	
38	107	38	38.6	25	21	20.6	
39	107	38	6.8	25	41	47.3	
40	107	39	1.2	25	47	26.2	
41	107	32	39.6	25	53	30.9	
42	107	25	28.0	25	40	39.2	
43	107	15	6.7	25	37	36.1	
44	107	8	1.6	25	47	24.7	
45	106	59	9.5	25	37	19.4	
46	106	57	12.7	25	35	31.6	
47	106	55	9.8	25	38	44.2	
48	106	43	30.1	25	50	40.9	
49	106	43	56.2	25	57	25.5	
50	106	33	36.8	25	53	25.2	
51	106	33	33.5	25	54	26.7	
52	106	32	45.6	25	57	13.0	
53	106	31	50.9	25	57	8.3	
54	106	31	27.4	25	56	51.4	
55	106	30	7.3	25	57	12.5	
56	106	29	32.8	25	58	2.9	
1	106	24	28.1	25	56	55.5	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Culiacán pertenece al Organismo de Pacífico Norte. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, en su porción suroccidental, en la que están vigentes tres decretos de veda: el primero de ellos es el “*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de las aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites del Distrito de Riego de Culiacán, Sin.*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 26 de noviembre de 1957; el segundo es el “*Decreto que declara de utilidad pública la expropiación de setenta mil hectáreas localizadas en el Valle de Pericos, Sin., para adicionar al Distrito de Riego de Culiacán (2a. publicación)*”, publicado en el DOF el 28 de marzo de 1958; y el tercero es el “*Decreto por el que se declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Riego del Río San Lorenzo, en terrenos del Municipio de Culiacán, Sin*” publicado en el DOF el 30 de mayo de 1974. Estas vedas se clasifican como tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la mayor parte de su superficie no rige ningún decreto de veda. La porción no vedada del acuífero Río Culiacán, clave 2504, se encuentra sujeta a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican*”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2013, los municipios Guanaceví, Badiraguato, Topia, Canelas y Tamazula se clasifican como una zona de disponibilidad 8; Guadalupe y Calvo, Navolato, Mocorito, Angostura y Cosalá como zona de disponibilidad 7; y los municipios Culiacán y Tepehuanes como una zona de disponibilidad 6.

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero se localiza parte de los distritos de riego DR 010 “Culiacán–Humaya” y 109 “Río San Lorenzo”; a la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona de estudio que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, a continuación se menciona el más reciente:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS RÍOS CULIACÁN, MOCORITO, SINALOA Y FUERTE, EN EL ESTADO DE SINALOA elaborado por SPIC Servicios y Proyectos de Ingeniería Civil, S.A. de C.V. en 2010 para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos a través del análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de las provincias fisiográficas de la República Mexicana del INEGI, la zona de estudio, está comprendida dentro de dos Provincias Fisiográficas, la provincia Sierra Madre Occidental, Subprovincia Gran Meseta y Cañadas Duranguenses y la Subprovincia Pie de la Sierra, y la Provincia Llanura Costera del Pacífico, Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa.

La Provincia Sierra Madre Occidental, está situada en la región oriental del Estado de Sinaloa; tiene un ancho promedio de 30 a 50 km; y elevaciones que varían de 2000 a 2700 msnm. Se caracteriza por su constitución ígnea. Su rasgo fisiográfico más importante está representado por altas mesetas riolíticas formada por derrames piroclásticos y por sierras sepultadas que se localizan entre las altas mesetas y la planicie costera.

Subprovincia Mesetas y Cañadas Duranguenses. Incluye un área extensa de grandes elevaciones topográficas, con inclinaciones preferentemente al occidente. Se caracteriza por presentar mesetas formadas por derrames piroclásticos de composición riolítica, con una topografía abrupta debido al gran número de cañones que la disectan.

Pie de la Sierra. Se extiende a lo largo de las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit, con una dirección NW-SE. Los acarrees provenientes del flanco oeste de la Sierra Madre Occidental sepultan gran parte de la región montañosa del borde occidental, de tal manera que solamente las cimas y picos de las cordilleras sobresalen como cerros aislados. Estas se localizan entre las altas mesetas riolíticas y la planicie costera, son montañas sepultadas parcialmente que hacia al oriente alcanzan alturas del orden de 150 m. Las rocas de esta franja son recientes, ya que es fácil reconocer sobre las lavas los centros de los focos de erupción y sus formas bien conservadas.

La Provincia Llanura Costera del Pacífico está caracterizada por abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, rías, depósitos eólicos y marinos, los cuales pueden ser clasificadas como unidades fisiográficas de acuerdo con el ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtas o de transición, eólicas y marinas.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima en el área que cubre el acuífero es muy variable. En la parte alta, prevalece un clima semi-seco con primavera seca y semi-frío extremoso, con régimen de lluvias de verano fresco y prolongado, con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales entre 20.1 °C y 31.2 °C. En la parte baja, se presenta un clima muy seco con humedad deficiente en todas las estaciones y cálido sin estación invernal, con lluvias en verano, las lluvias invernales son menores que el 13 % del total anual, extremoso con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, varía entre 18.8 °C y 29.4 °C. En la zona intermedia entre las dos anteriores, se registra un clima seco, con primavera seca y cálida con invierno benigno.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de cinco estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Culiacán, El Varejonal, Sanalona, La Huerta y Guatenipa. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anual de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **808.3 mm, 25.2°C y 1,738.5 mm anuales**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos y otro que abarca de noviembre a abril, con precipitaciones menos significativas. La época de estiaje se registra de marzo a junio.

3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero Río Culiacán se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 10, Sinaloa, cuenca del Río Culiacán.

3.4. Geomorfología

El área de estudio presenta dos rasgos fisiográficos principales; una zona de planicie y otra montañosa, la primera de ellas es sensiblemente plana con una ligera pendiente hacia el Golfo de California, mientras que los rasgos montañosos se inician hacia el oriente, en dirección hacia la Sierra Madre Occidental, que se caracteriza por presentar relieves más accidentados, donde generalmente los valles son estrechos en forma de “v” y las corrientes poseen gradientes considerables, por lo que se considera que se encuentran en una etapa juvenil. En la zona de planicie, el Río Culiacán ha depositado materiales deltaicos, formando numerosos meandros que hacia su desembocadura se vuelven divagantes, dejando huellas de antiguos cauces, que en muchos casos han sido habilitados como drenes agrícolas. Estos cauces por lo general tienen la forma típica de “u” por lo que se considera a la planicie en etapa de madurez avanzada. Hacia el este y sureste, los arroyos se amplían adquiriendo los relieves topográficos formas más suaves y redondeadas, por lo que se considera que se encuentran en una etapa de madurez incipiente.

4. GEOLOGÍA

La región se caracteriza por una gran variedad de rocas con edades que varían desde el Paleozoico Superior hasta el Holoceno, incluyen rocas meta-vulcanosedimentarias, vulcanosedimentarias, sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas.

El análisis de los materiales geológicos tanto de la zona fisiográfica de la sierra como de los valles, indica que éstos se constituyen de rocas ígneas o sedimentarias del Cenozoico Medio y Superior que cubren gran parte de la serranía y por formaciones del Mesozoico representadas por rocas metamórficas.

Las características geológicas de la zona de estudio se pueden clasificar en tres grupos básicos: la faja costera, que está formada por capas recientes de Pleistoceno, formaciones geológicas del principio de la Era Cuaternaria; la región central por la naturaleza volcánica rocosa del Cenozoico y las partes elevadas de la sierra, principalmente por rocas metamórficas de la Era Mesozoica (figura 2).

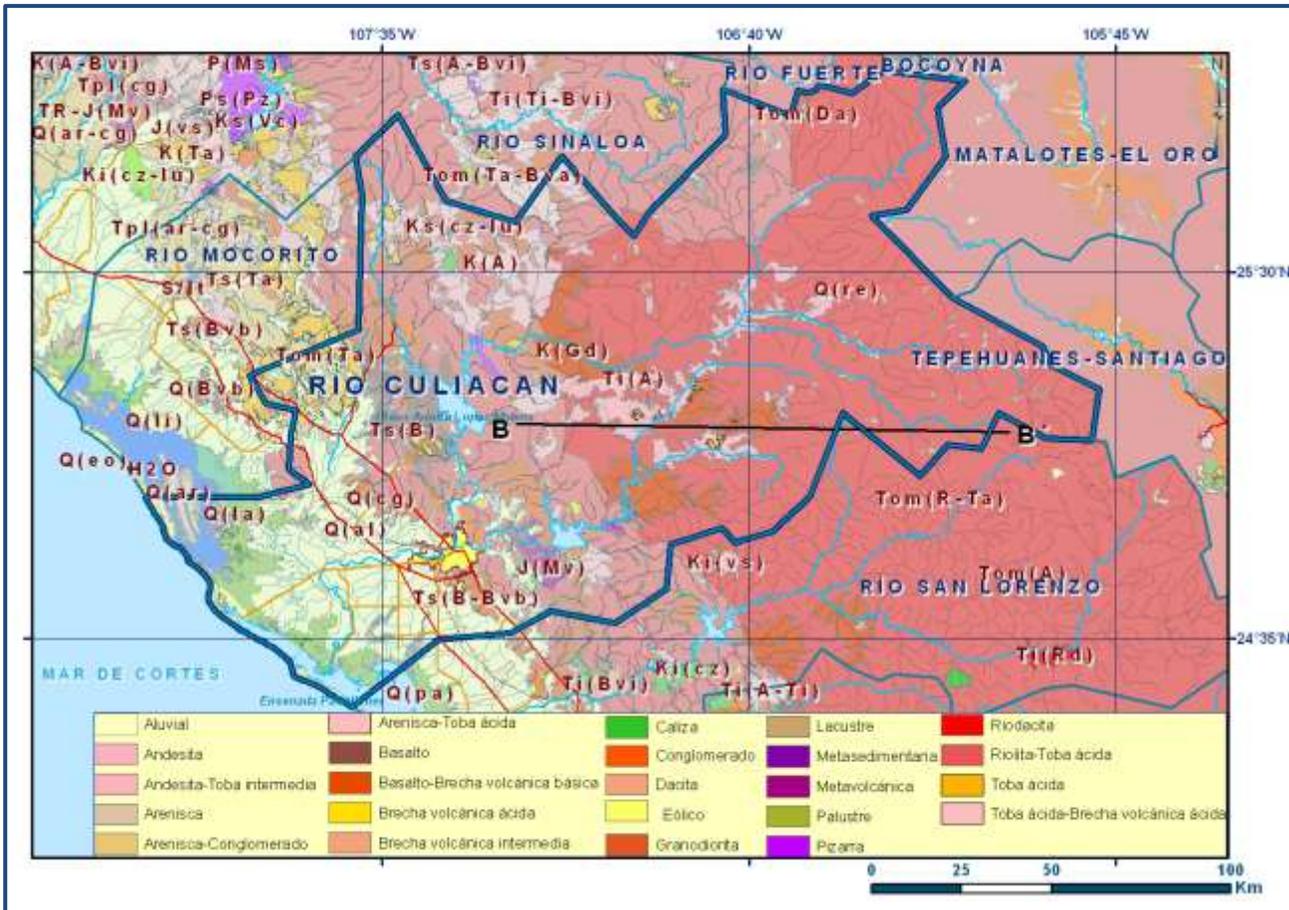


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La descripción de la estratigrafía de la región está basada en la Carta Geológico-Minera “Pericos” G13-7. Escala 1:250 000, Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1999. Las unidades se mencionan en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente:

Paleozoico

El basamento de la región está constituido por una secuencia meta-volcanosedimentaria conformada por pizarras, esquistos, cuarcitas, metaandesitas y filitas que por su correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia (Malpica, 1974) al norte de Sinaloa, se le ubicó en el Paleozoico Superior. Subyace discordantemente a las unidades de la cubierta mesozoica y terciaria y cabalga a rocas más jóvenes en algunas zonas.

Jurásico

El Jurásico Superior está representado por el Conglomerado Guanaceví, compuesto por fragmentos de cuarzo y metaandesitas, que por posición estratigráfica se les ha asignado una edad

correspondientes al Tithoniano, ya que subyace concordante y transicionalmente a la unidad de limolitas y tobas andesíticas del Cretácico Inferior, ubicada bioestratigráficamente en el Berriasiano (López, 1998).

Cretácico

El Cretácico Inferior está integrado por una secuencia vulcanosedimentaria representada por limolitas y tobas andesíticas del Berriasiano Medio (López, 1998 *op. cit.*); al Aptiano corresponden las lavas almohadilladas, relacionadas al piso oceánico y las andesitas de medios continentales; el Albiano está integrado por dos secuencias sedimentarias representadas por caliza-lutita y lutita-arenisca, cuya edad se asignó al Albino, de acuerdo con su contenido fósil de amonitas mal preservadas (Ortega, 1979).

Las rocas intrusivas están representadas principalmente por un cuerpo dunítico considerado del Cretácico Inferior, que flora al poniente de El Palmar de Los Sepúlveda. Del Cretácico Superior es el batolito granodiorítico de Sinaloa que aflora principalmente hacia el pie de la sierras, zona de costa y partes bajas; ambas unidades se encuentran afectando a las rocas más antiguas.

Terciario-Paleógeno

Descansa en discordancia sobre el Cretácico Inferior y está integrado por andesitas y tobas andesíticas correlacionables con la Formación San Blas, que por su posición estratigráfica se les asigna al Paleoceno-Eoceno (Ledezma, 1971). Al vulcanismo del Paleógeno Temprano le prosigue un periodo sin magmatismo, en donde la erosión rellenó con materiales clásticos algunas cuencas continentales, constituidas por unidades sedimentarias conglomeráticas consolidadas, una compuesta principalmente por fragmentos de arenisca, caliza y cuarzo; otra de fragmentos de arenisca, lutita, caliza y limolita. En el Terciario Paleógeno-Neógeno se presenta un intenso vulcanismo de tipo explosivo caracterizado por tobas riolíticas e ignimbríticas que coronan las partes altas de la Sierra Madre Occidental. Su edad se determinó por correlación con rocas similares datadas al suroeste del distrito minero Tayoltita, ubicándolas en el Oligoceno-Mioceno (Smith y Hall, 1974). Este paquete descansa en discordancia sobre los depósitos continentales de relleno de fosa de finales del Terciario-Paleógeno y está cubierto discordantemente por una secuencia sedimentaria constituida por una alternancia de areniscas y limolitas de estratificación delgada, denominada Formación San Ignacio; Fredrikson (1974), define que estos depósitos son post-ignimbríticos desarrollados en fosas formadas por fallas gravitatorias, ocurridas con mayor frecuencia en la planicie costera y al pie de las montañas. En los últimos eventos volcánicos neogénicos se definen gruesas coladas de andesitas basálticas que cubren, en discordancia, a las rocas riolíticas en la porción sureste. El final de este periodo se define por un depósito continental formado por un conglomerado polimíctico consolidado a semiconsolidado, constituido por clastos de las rocas preexistentes que cubren parcialmente en discordancia a la secuencia vulcanoclástica y a las secuencias volcánicas descritas anteriormente.

También del Terciario se presenta un intrusivo post-batolítico (Eoceno) que varía en su composición de granodiorita, diorita a cuarzomonzonita; este intrusivo se encuentra afectando a la granodiorita del Cretácico Superior y a todas las rocas preexistentes. Existen también algunos afloramientos de gabro en el área de Bacubirito y de kimberlita en el área de Surutato. Los cuerpos intrusivos están afectados por generaciones de diques andesíticos así como de cuerpos subvolcánicos representados por pórfidos de composición andesítica y riolítica, los cuales están ligados íntimamente a la mineralización polimetálica de la región.

Cuaternario

Finalmente el Cuaternario está constituido por andesitas basálticas, brechas de la misma composición, derrames basálticos, depósitos aluviales, fluviales, litorales y lacustres.

4.2. Geología estructural

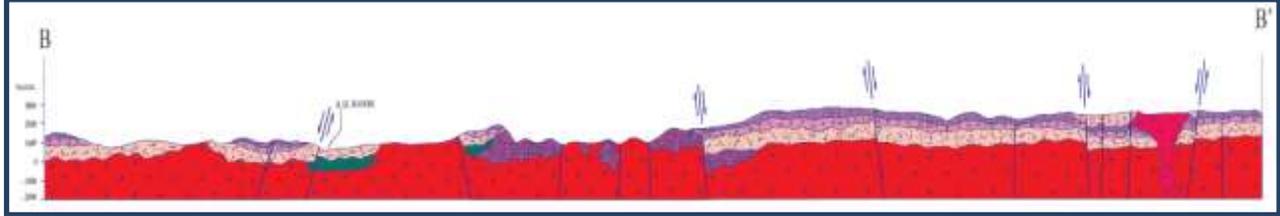
La situación geográfica y las características geológicas del estado de Sinaloa favorecen la observación de los principales rasgos estructurales de la secuencia de rocas existentes en la región. Los rasgos estructurales son claramente observables en rocas paleozoicas y mesozoicas, disminuyendo su intensidad en relación inversa a su edad, es decir, que se puede observar que los efectos de los esfuerzos compresivos en las rocas desde el Paleozoico hasta el Mesozoico Tardío o Cenozoico Temprano, disminuyeron rápidamente en las rocas más jóvenes.

La interpretación de imágenes de satélite y datos de campo revelan que estructuralmente la región está afectada por un patrón de fallas normales NW-SE, que constituyen una serie de fosas tectónicas en forma escalonada, ocasionalmente con desplazamientos laterales. En menor proporción existe fallamiento inverso, representado al noroeste por la cabalgadura de las rocas paleozoicas sobre las cretácicas; el segundo patrón de fallamiento presenta dirección NE-SW y está evidenciado por los ríos Tamazula, Humaya y Mohinora-Sinaloa, provocando desplazamientos de bloques e interrupción y formación de estructuras, como el caso del colapso de la caldera que se localiza al sureste (Carta Geológico-Minera "Pericos" G13-7. Escala 1:250 000, SGM, 1999).

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y llanura de inundación del Río Culiacán, así como en los conglomerados y sedimentos lacustres, que tienen varios cientos de metros hacia el centro de los valles. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas extrusivas (volcánicas), como andesitas riolitas y brechas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico, están representados por las mismas rocas ígneas al desaparecer al fracturamiento a profundidad (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Miera "Pericos" G13-7, Esc. 1:250 000, SGM 1999
Figura 3. Sección geológica

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre, heterogéneo y anisótropo**, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como en los conglomerados polimícticos y sedimentos lacustres, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, entre las que destacan andesitas, riolitas y brechas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se realizaron 3 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación, además de otras que se realizaron en acuíferos vecinos. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob, tanto en etapa de abatimiento como recuperación. Los resultados de su interpretación indican que los valores de transmisividad varían de $3.24 \times 10^{-3}/s$ ($280.1 \text{ m}^2/\text{día}$) a $9.75 \times 10^{-3}/s$ ($843.3 \text{ m}^2/\text{día}$). Si consideramos un espesor saturado promedio de 120 m, los valores de conductividad hidráulica varían de 2.7×10^{-5} a $8.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (2.3 a 7.0 m/d), que se asocian a sedimentos de granulometría fina a media.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, por correlación con acuíferos vecinos que tienen la misma constitución geológica, para fines del balance se adoptó un valor de **0.11**.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información piezométrica de 2005 y 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

En 2010 la profundidad del nivel estático presentó valores menores de 1 m en la zona de costera, entre los poblados Colonia Agrícola Michoacana y Ejido Cinco de mayo, hasta valores superiores a 19 m, en las inmediaciones del poblado Campo El Diez, ubicado en la porción oriental del acuífero. En porción norte del acuífero las profundidades son aproximadamente de 8 m cerca del poblado Santiago de Comanjito y disminuyen hacia el sur hasta 5 m en los alrededores del poblado Pericos, siguiendo en la misma dirección disminuye hasta menos de 1 m en la zona cercana al poblado 5 de Mayo (figura 4).

En la porción central de la zona de balance, las profundidades muestran una fuerte variación debido a la explotación por bombeo, con valores superiores a 8 m en la zona nororiental, cerca del poblado San Pedro, disminuyendo en dirección hacia la línea de costa, en el sentido de escurrimiento del Río Culiacán, en donde se registran profundidades menores a 2 m.

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2010 variaba de 3 a 140 msnm; la dirección del flujo subterráneo está condicionada por la topografía de la zona, los valores más bajos se registran en la zona costera desde donde se incrementan hacia las zonas topográficamente más altas (figura 5).

En la porción centro-occidental de la zona de balance se observa un domo de niveles estáticos que alcanza elevaciones hasta de 12 msnm cerca del poblado Cofradía de La Loma, localizado en la parte baja del valle y en la margen derecha del río Culiacán. Al norte de la zona de balance, el nivel estático se encuentra a 70 msnm cerca del poblado Santiago de Comanjito; siguiendo una dirección suroeste los niveles disminuyen gradualmente hasta 3 msnm cerca de la costa, en los alrededores del poblado Emiliano Zapata.

En la región centro-norte, los niveles estáticos son superiores a 50 msnm en los poblados Campo Morelia y El Limón de Los Ramos, disminuyendo gradualmente en dirección sur, hasta alcanzar valores menores a los 4 msnm cerca del poblado Las Bebelamas de Sataya, en la cercanía de la costa. En la zona de recarga ubicada al oriente del acuífero, los valores de elevación son del orden de 60 msnm en los poblados de Mojolo, Plan de Oriente y Vallado Viejo, a partir de donde descienden en dirección sureste hasta 20 msnm en el poblado Bachigualato, continuando el descenso hacia la costa donde la elevación es de 4 msnm, en el poblado Laguna de Bataoto.

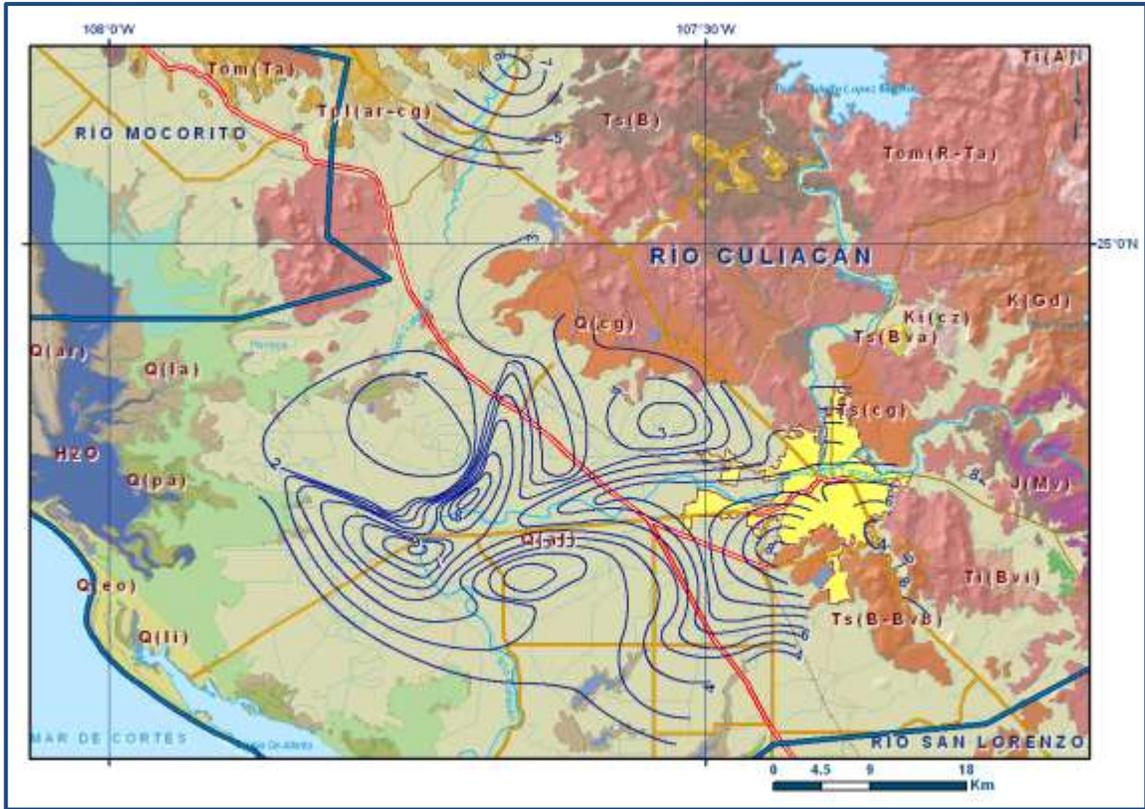


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

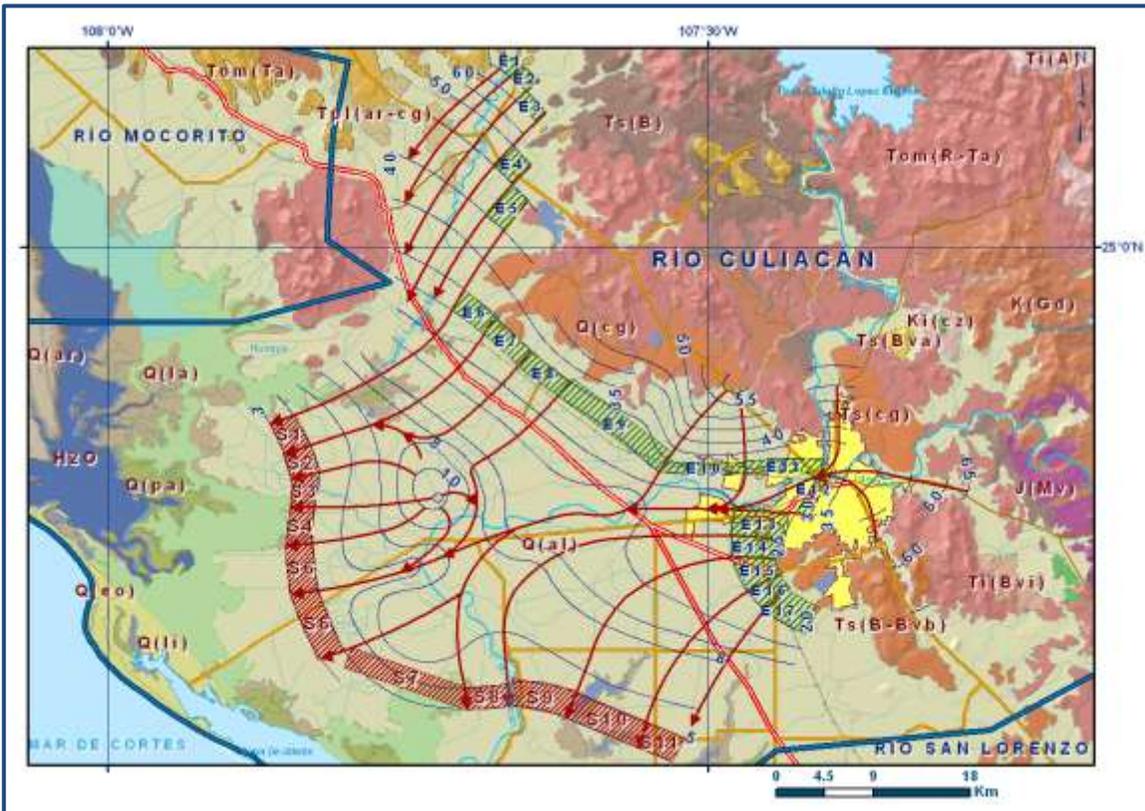


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2005- 2010, se pueden distinguir 3 zonas principales que muestran diferentes efectos producidos por la explotación del acuífero. En la primera, ubicada al oriente de la zona de balance, se observan recuperaciones hasta de 4 m en la región comprendida entre los poblados Bachoco y Los Reyes; la segunda es una extensión alargada entre la ciudad de Culiacán y el poblado La Curva, al poniente de la zona de balance, en donde también se registran recuperaciones que varían de 0.5 m a 2 m; la tercera zona se localiza en los alrededores de la ciudad de Navolato y presenta abatimientos máximos de 2 m (figura 6). De manera general, el nivel estático se ha recuperado, por lo que se considera un cambio de almacenamiento positivo en el acuífero.

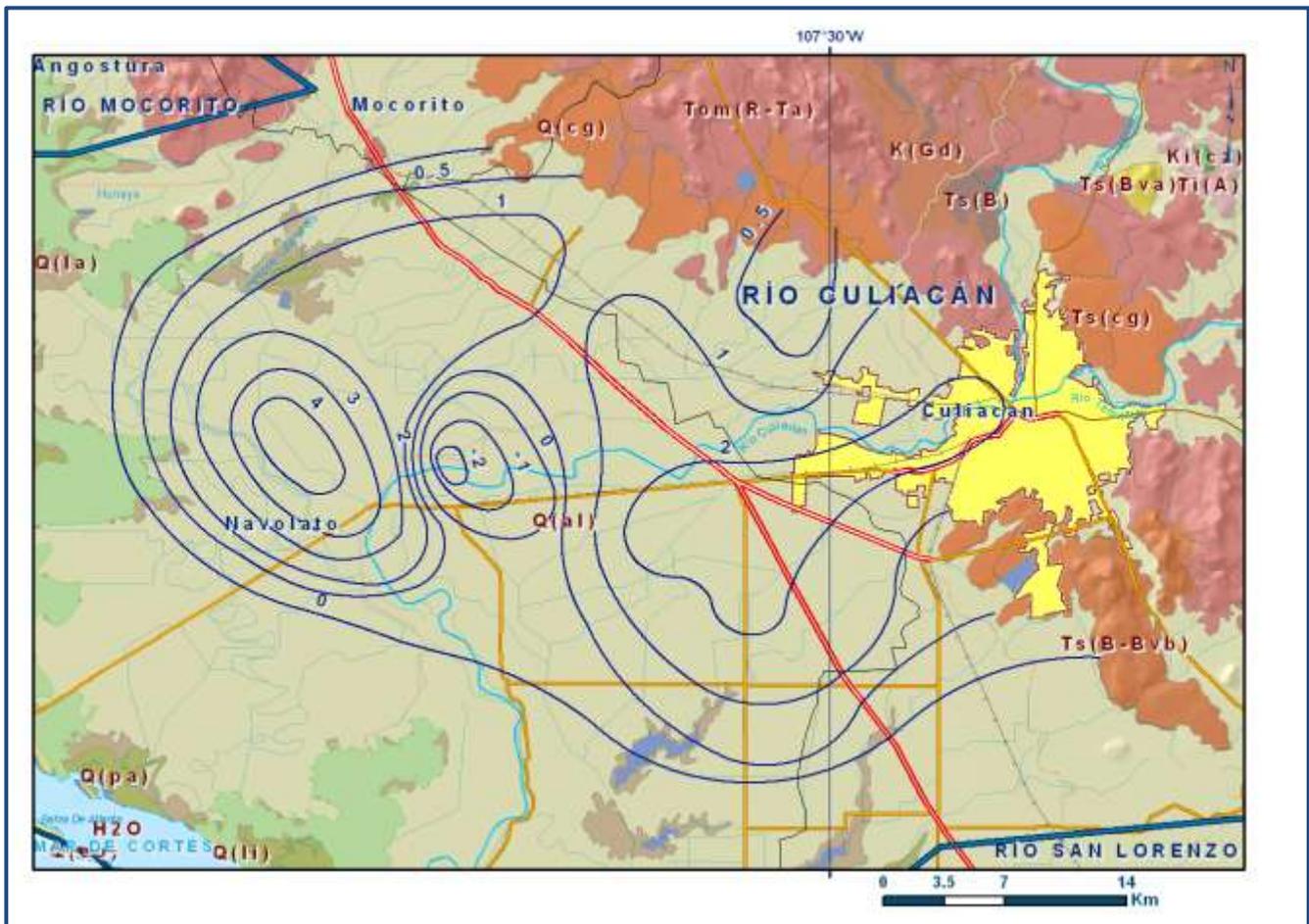


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2005-2010)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 5 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, potencial de hidrogeno iones principales, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (STD), metales traza y parámetros bacteriológicos, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Adicionalmente se realizaron determinaciones *in situ* de temperatura, pH, conductividad eléctrica y concentración de STD en 700 aprovechamientos.

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos, se establece que las concentraciones de los algunos iones y elementos en algunas muestras sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 59 a 6 500 ppm, que sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm que establece dicha NOM para el agua potable. De manera general, predominan las concentraciones de 400 ppm cerca del Río Culiacán, mientras que los valores entre 1000 y 2800 ppm se registran en los aprovechamientos cercanos a la costa. Los valores más altos de concentración de STD se asocian a fuentes puntuales de contaminación urbana y agrícola, provocadas por las descargas de aguas residuales urbanas e industriales, por el uso de agroquímicos y por los retornos agrícolas.

La conductividad eléctrica varía de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores más altos se registran cerca de la costa, disminuyendo gradualmente conforme se asciende topográficamente a lo largo del cauce del Río Culiacán, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo. En cuanto al pH se obtuvieron valores que varían entre 4 y 8, con un pH constante de 7 en la parte baja y centro del acuífero, mientras que en la parte alta presenta valores de 8.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, predominan las familias cálcica-bicarbonatada y sódico bicarbonatada, que representan agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2010, se registraron 991 aprovechamientos, de los cuales 725 son pozos profundos y 258 norias, 4 manantiales, 3 galerías filtrantes y 1 jagüey, del total de obras, 758 se encuentran activas y 233 inactivas.

El volumen de extracción total asciende a **168.9 hm³ anuales**, de los cuales 89.9 hm³ (53.3%) se destinan al uso agrícola, 70.8 hm³ (41.9%) al uso público-urbano, 3.6 hm³ (2.1%) para uso industrial, 4.4 hm³ (2.6%) al uso doméstico- abrevadero y 0.2 hm³ (0.1%) a otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2005-2010 en una superficie aproximada de **1,843 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localizan la mayoría de los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\text{Entradas (E) - Salidas(S) = Cambio de masa}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero:

$$\text{Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento}$$

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero, estos volúmenes se agrupan en una variable denominada recarga inducida (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rv + Eh + Ri - B - Sh - Dfb - Dm - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga inducida
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- Dfb:** Descarga por flujo base de ríos
- Dm:** Descarga por manantiales
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Rv = B + Sh + Dfb + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

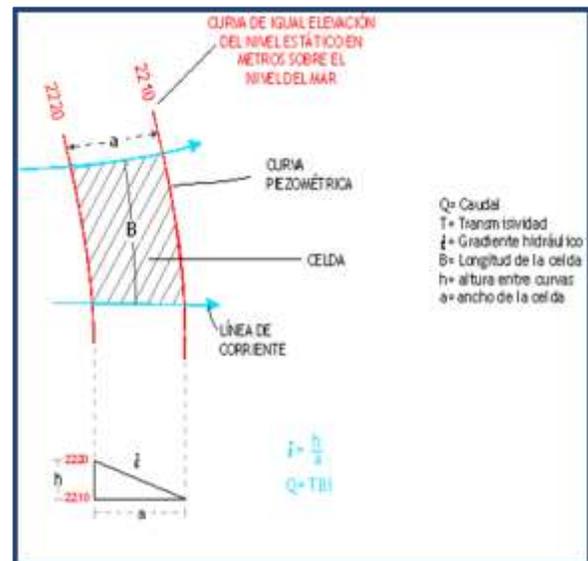
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tienen su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para 2010 (figura 5). Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde:

- Q =** Caudal (m^3/s)
- T =** Transmisividad (m^2/s)
- B =** Longitud de la celda (m)
- i =** Gradiente Hidráulico (adimensional)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **45.8 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas horizontales (2010)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1,153	1,424	5	0.003510	0.0127	0.0513	1.6
E2	1,917	1,482	5	0.003374	0.0127	0.0820	2.6
E3	2,630	1,209	5	0.004135	0.0065	0.0707	2.2
E4	2,397	2,399	5	0.002084	0.0065	0.0325	1.0
E5	2,048	3,495	5	0.001431	0.0065	0.0191	0.6
E6	3,553	2,041	5	0.002450	0.0065	0.0566	1.8
E7	4,266	1,775	5	0.002818	0.0065	0.0782	2.5
E8	4,336	1,719	5	0.002909	0.0065	0.0821	2.6
E9	10,980	2,029	5	0.002465	0.0065	0.1761	5.6
E10	6,895	904	5	0.005532	0.0065	0.2482	7.8
E11	6,712	1,230	5	0.004064	0.0065	0.1775	5.6
E12	4,027	981	5	0.005098	0.0127	0.2602	8.2
E13	2,470	4,693	5	0.001065	0.0065	0.0171	0.5
E14	1,938	4,106	5	0.001218	0.0065	0.0154	0.5
E15	2,450	3,383	5	0.001478	0.0065	0.0236	0.7
E16	1,816	3,044	5	0.001643	0.0065	0.0194	0.6
E17	3,712	2,741	5	0.001824	0.0065	0.0441	1.4
Total							45.9

7.1.3. Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de superficie y láminas de riego por cultivo, se consideró un coeficiente de infiltración. El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 847.9 hm³ anuales, de los cuales 89.9 hm³ son agua subterránea y 758.0 hm³ agua superficial. Si consideramos que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, obtenemos un volumen de 169.6 hm³/ año de recarga por retornos de riego.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y de alcantarillado es del orden del 20 al 45 %. Para este caso se consideró que el 15% del volumen destinado al uso público urbano (70.8 hm³ anuales) se infiltra como recarga efectiva al acuífero. Es decir que la recarga inducida de esta manera es de 10.6 hm³ anuales.

Por lo tanto el volumen de la recarga inducida (Ri) es de **Ri = 180.2 hm³/año.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas horizontales (Sh), a través de evapotranspiración (ETR) y por descarga por flujo base de los ríos (Dfb).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **168.9 hm³/año.**

7.2.2. Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas se evalúan de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración del elevación del nivel estático del año 2010 (figura 5), el cálculo se muestra en la tabla 3. El volumen total estimado de salidas por flujo subterráneo es de **15.7 hm³ anuales.**

Tabla 3. Calculo de salidas subterráneas (2010)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3,096	2,304	1	0.000434	0.0203	0.0273	0.9
S2	2,491	2,501	1	0.000400	0.0203	0.0202	0.6
S3	2,903	2,106	1	0.000475	0.0203	0.0280	0.9
S4	3,494	2,058	1	0.000486	0.0203	0.0345	1.1
S5	4,467	2,346	1	0.000426	0.0203	0.0387	1.2
S6	6,248	2,346	1	0.000426	0.0203	0.0541	1.7
S7	10,609	1,921	1	0.000521	0.0203	0.1123	3.5
S8	3,689	2,017	1	0.000496	0.0203	0.0372	1.2
S9	5,335	2,474	1	0.000404	0.0203	0.0439	1.4
S10	6,648	2,471	1	0.000405	0.0250	0.0673	2.1
S11	3,340	2,433	1	0.000411	0.0250	0.0343	1.1
Total							15.7

7.2.3. Descarga por flujo base de los ríos (Dfb)

De acuerdo con la información obtenida de aforos, se determinó que en la parte baja el acuífero el Río Culiacán descarga un caudal aproximado de 1 m³/s en época de estiaje, que equivalen a un volumen de descarga de **31.5 hm³/año.**

7.2.4. Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo realizado en el 2010, se identificó la existencia de 4 manantiales dentro de la zona, con descarga conjunta de 7.5 lps. El volumen de descarga estimado asciende a **0.2 hm³/año,**

7.2.5. Evapotranspiración (ETR)

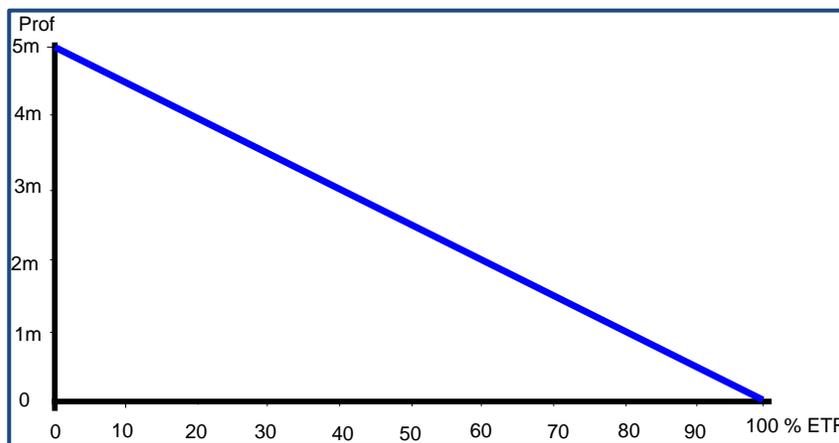
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando el valor promedio anual de temperatura (24.9 °C) y precipitación (656.5 mm) obtenido de la estación Culiacán que es representativa de la zona de explotación en el acuífero:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	24.9		
P(mm) =	656.5	P ² =	430992.25
L =	1694.41245	L ² =	2871033.55
ETR (mm)	640.6		
ETR (mm)	213.5		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.

La lamina de ETR obtenida es de 640.6 mm anuales; sin embargo, debido a que existen grandes superficies que presentan niveles freáticos someros sujetos a la evapotranspiración real, a que en la región se presentan dos periodos de lluvias bien definidos (el de mayor magnitud durante el verano y otro invernal) y a que existe una gran diferencia en los valores de precipitación y temperatura originada por la diferencia de altitud a la que se encuentran ubicadas las estaciones, para no sobre estimar el valor de esta componente, se consideraron los valores medios anuales de precipitación y temperatura de la estación o estaciones climatológicas representativas del valle en el que se localiza el área de balance, únicamente durante el periodo de estiaje, que comprende de febrero a mayo. Por lo tanto, la lámina de ETR utilizada para obtener el volumen de agua evapotranspirado es de 213.5 mm que representan el 33.3 % de la lámina anual.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, a las diferentes profundidades consideradas, el cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración es de **168.0 hm³/año**.

Tabla 4. Calculo de le Evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad Considerada (m)	Area (km ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (hm ³ /año)
0 a1	0.5	81	0.95	0.2135	16.5
1 a 2	1.5	136	0.85	0.2135	24.7
2 a 3	2.5	405	0.75	0.2135	64.8
3	3.0	13	0.70	0.2135	1.9
3 a 4	3.5	258	0.65	0.2135	35.9
4	4.0	14	0.60	0.2135	1.8
4 a 5	4.5	191	0.55	0.2135	22.5
Area		1,098.1	ETR		168.0

7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

Para la estimación del cambio de almacenamiento se consideró la evolución del nivel estático para el periodo 2005-2010. Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático, y considerando un coeficiente de almacenamiento promedio $S=0.11$, se determinó la variación del almacenamiento con la siguiente expresión:

$$\Delta VS = S * A * h$$

Donde:

ΔVS = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A = Área entre curvas de igual evolución del nivel estático (km^2);

h = Valor medio de la variación piezométrica en el período (m);

En la superficie de balance de $1,843 \text{ km}^2$ se manifiesta un cambio de almacenamiento de 162.8 hm^3 para el periodo 2005-2010, que equivalen a 32.6 hm^3 anuales, por lo que $\Delta V(S) = 32.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ (tabla 5).

Tabla 5. Calculo del cambio de almacenamiento

Rangos de evolución (m)	Evolución (m)	Area (km^2)	S	$\Delta V(S)$ (hm^3/a)
0	0	565.0	0.11	0.0
0 a 0.5	0.25	197.1	0.11	5.4
0	0	4.4	0.11	0.0
0 a 0.5	0.25	19.5	0.11	0.5
0 a -1	-0.5	27.0	0.11	-1.5
-1 a -2	-1.5	13.2	0.11	-2.2
-2	-2	2.5	0.11	-0.6
0.5 a 1	0.75	318.0	0.11	26.2
1 a 2	1.5	151.8	0.11	25.0
2 a 3	2.5	50.2	0.11	13.8
3 a 4	3.5	34.1	0.11	13.1
4	4	16.5	0.11	7.2
0.5	0.5	30.8	0.11	1.7
1 a 2	1.5	303.4	0.11	50.1
2	2	107.8	0.11	23.7
0.5	0.5	1.6	0.11	0.1
AREA		1,842.9	TOTAL	162.8
Promedio anual				32.6

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro falta por determinar es la infiltración vertical (R_v), el cual será calculado a partir de la ecuación (2):

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + Dfb + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Ri \\ R_v &= 168.9 + 15.7 + 31.5 + 0.2 + 168.0 + 32.6 - 45.9 - 180.2 \\ R_v &= 190.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R_t) es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + Eh + Ri \\ R_t &= 190.8 + 45.9 + 180.2 \\ R_t &= 416.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS: Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

Rt: Recarga total media anual;

DNCOM: Descarga natural comprometida;

VCAS: Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1. Recarga total media anual (R_t)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R_t), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **416.9 hm³/año**, de los cuales 236.7 hm³ son recarga natural y 180.2 hm³ recarga inducida.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el acuífero Río Culiacán su valor es de **173.4 hm³ anuales**, de los cuales 15.7 hm³ corresponden a las salidas subterráneas horizontales hacia el mar para mantener la posición de la interface marina, 31.5 hm³ a la descarga por flujo base, 0.2 hm³ a la descarga a través de manantiales y 126.0 hm³ al 75 % de la Evapotranspiración que se debe comprometer para preservar el ecosistema costero y ribereño.

Por lo tanto, la **DNCOM** es de **173.4 hm³ anuales**.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2013** es de **222'826,077 m³/año**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$\begin{aligned} \text{DAS} &= \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \\ \text{DAS} &= 416.9 - 173.4 - 222.826077 \\ \text{DAS} &= 20.673923 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

La cifra indica que existe un volumen anual disponible de **20'673,923 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2010. Estudio Geohidrológico de los acuíferos de los ríos Culiacán, Mocorito, Sinaloa y Fuerte, en el estado de Sinaloa, elaborado por SPIC, Servicios y Proyectos de Ingeniería Civil, S.A. de C.V.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológica-Miera "Pericos" G13-7, Sinaloa, Durango y Chihuahua.